

2. Грезин А.К., Зиновьев В.С. Микрокриогенная техника. - М.; Машиностроение, 1977.- 232 с.
3. Довгялло А.И., Лукачев С.В. Сильфонные тепловые, холодильные и компримирующие машины. Самара: - Самарский государственный аэрокосмический университет, 1998. 98 С.
4. Довгялло А.И., Докторов О.Ю. Определение гидравлических потерь в камере гидропривода сильфонного микрокомпрессора // Вестн. СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып.2, Самарск. гос. ун-т, Самара, 1999. - С. 47 - 55.
5. Френкель М.И. Поршневые компрессоры. - М.: Машиностроение, 1969. 744 с.

УДК 621.45.03:532.533.697.7.3:534.115:534.134:532.527

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД

Ф.И. Еланчик

*ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара*

Статья посвящена методике классификации и исследования нерегулярных колебаний малой амплитуды в газе, протекающем через тракт ГТД. Известно (см. напр. [1], [2]), что некоторые виды колебаний могут считаться малосущественными и не подвергаться изучению.

К этим видам относятся, в частности, колебания, в которых  $A_q \ll Q$ , где  $A_q$  - амплитуда низкочастотных колебаний рабочего параметра (например, давления воздуха, расхода топлива или воздуха, температуры в тракте ГТД),  $Q$  - стационарное значение параметра. Для давления воздуха в тракте ГТД последнее утверждение может быть применимо, если напорные характеристики компрессора не являются "пологими", что справедливо для точек рабочей линии многоступенчатого компрессора. Статья посвящена некоторым случаям, когда это правило неприменимо. Существенность колебаний давления газа оценивается в этих случаях по отношению их амплитуд к скоростным напорам струй газа в магистральных и ёмкостях, причем отличие данного случая проявляется при малых

числах  $M$  потока. Такие колебания могут быть существенными лишь при выполнении следующих условий:

а) частота колебаний мала по сравнению с собственными частотами акустических колебаний (в направлении потока) в тех ёмкостях, где последние колебания не рассеиваются (малы гидравлические сопротивления);

б) течение газа имеет вихревой характер, или (и) имеются струи со свободными границами, период рассматриваемых колебаний составляет несколько времён протекания газа через участки с длиной, равной калибру струи.

Такие колебания по уровню амплитуды в ряде случаев не отличаются от колебаний, которые с основанием считаются малосущественными. Критерием существенности иногда считают регулярность колебаний. Однако, как известно (см.[3]), колебания в камерах сгорания газотурбинных установок могут быть нерегулярными. Известно также, что колебания потоков газа отличаются следующими свойствами.

а) Колебания потоков происходят не в добротных резонансных контурах, но вызываются активными источниками и усилителями (в качестве которых выступают процессы отрыва потока от стенок, сдува застойных зон и т.д.); они идут с большими затратами энергии. В этих условиях непостоянство частоты колебаний не является помехой к усилению, амплитуда же колебаний слабо зависит от внешних динамических возмущений и случайных факторов (а дискретность спектра не свидетельствует от обратном).

б) Колебания имеют множество одновременно и параллельно реализуемых источников и контуров обратных связей, нелинейно взаимодействующих друг с другом и не всегда согласующихся по частоте. Поэтому отклонение колебаний от регулярных является весьма вероятным.

в) Наличие большого количества частот колебаний, распределенных по широкому диапазону, ведет к относительно высокой вероятности проявления вибрационных резонансов.

Таким образом, в данном случае критерий регулярности неприменим. Ниже предлагается физический принцип выделения существенных колебаний свободных струй. Экспериментальное выявление таких колебаний производится по сочетанию данных об амплитуде, частоте колебаний, месту постановки датчика. Используются оценки влияния условий

ведения испытаний и сопоставление результатов, получаемых при разных условиях, сопоставления показаний датчиков, установленных в разных местах тракта, теоретические оценки разбросов возможных интерпретаций одних и тех же показаний датчиков. При технической возможности желательно применение визуализации потока, проводимой с сохранением его физических характеристик.

Полагаем, что если колебания данной физической природы, параметры которых могут быть для разных условий эксперимента предсказаны по результатам измерений, проведенных в конкретном эксперименте, существенно влияют на параметры и работоспособность полноразмерного двигателя в штатных условиях, то они должны быть признаны существенными для тех условий, в которых они измеряются. Опустим здесь случаи весьма высоких и весьма низких частот колебаний, а также случай малого влияния колебаний на протекание физических процессов, в которых малосущественность колебаний очевидна. Из других видов малосущественных колебаний рассмотрим такие, при которых влияние колебаний на сопряженные процессы есть, но слабо зависит от частоты, сочетания гармоник, и потому неотличимо от влияния стационарных изменений параметров. В этих случаях существенными оказываются не колебания, как процесс, а некоторые их стационарные характеристики (например, пути перемешивания - максимальные и средние - в разобранных ниже примерах).

Рассмотрим вихревые колебания, происходящие вследствие трения струй газа, параллельных друг другу и взаимодействующих на участке ограниченной длины (см. рис.1). К таким колебаниям сводятся процессы развития и вырождения струй, вытекающих из отверстий и следов за плохо обтекаемыми телами, а также

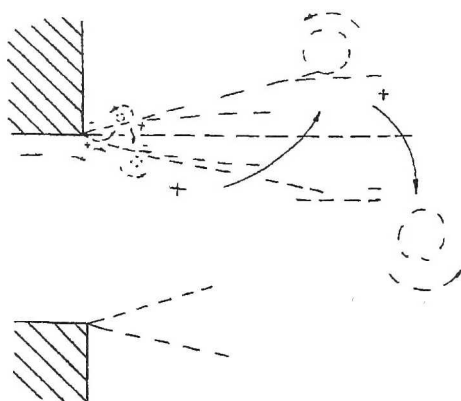


Рис. 1. Схема взаимодействия параллельных струй

вихревых жгутов за боковыми кромками крыльев летальных аппаратов, процессы в “слоях следа” пограничных слоев у стенок магистралей и т.д. Колебания потока имеют следующие характерные свойства:

а) Размеры источника колебаний (области порождения) порядка поперечных размеров слоя смешивания струй.

б) Возмущение скорости потока в окрестности источника колебаний (квадрупольного) обратно пропорционально третьей (или большей) степени расстояния от источника. Возмущение общего расхода обратно пропорционально второй степени этого расстояния.

в) Колебания возбуждаются сразу во многих источниках вдоль границы струи. Частоты, размеры и расположение вихрей оказываются переменными в пространстве - времени.

г) Колебания практически не наблюдаются на расстояниях от твердых границ газового потока, малых по сравнению с размерами возникающих вихрей (причина: распад вихря при сильной неравномерности поля давлений среды в пространстве). Пример - малая величина постоянной Прандтля  $\chi$  по сравнению с 1 (см. напр. [4], стр.663, 666).

д) Колебания не влияют на характер потока в его сечениях выше мест формирования колебаний. Отдельные колебания происходят практически без взаимодействия с твердыми поверхностями.

Таковы гидродинамические факторы, в силу которых эти колебания представляются малосущественными.

Далее рассмотрим существенные колебания. Для распознавания описанных ниже процессов по результатам измерений желательно располагать результатами измерений, проводимых в одной и той же камере сгорания при различных условиях испытаний. Такие измерения позволяют отличить процессы, связанные с существенным изменением конфигурации одной - двух застойных (вихревых, циркуляционных) зон, от процессов связанных с небольшими изменениями большого количества таких зон.

Рассмотрим вынужденные колебания струи, возбуждаемые от источника, расположенного выше места вдува струи в ёмкость (т.е. сдвинутого относительно этого места в направлении против потока). Перечислим свойства колебаний:

а) Размеры источника имеют порядок поперечных размеров струи.



б) В фазах ускорения и замедления струи при достаточном темпе изменения скорости происходит “сдвиг” спутной застойной зоны. Во втором случае этот “сдвиг” происходит в силу разрыва струи, либо её “пережатия” и возникновения “упора” струи в захватываемое вещество спутной зоны (см. рис.2). В более общем классе колебаний (см. ниже) полного “сдвига” застойной зоны не происходит, но имеет место уменьшение её объема, происходящее либо с основной частотой колебаний, либо с удвоенной частотой.

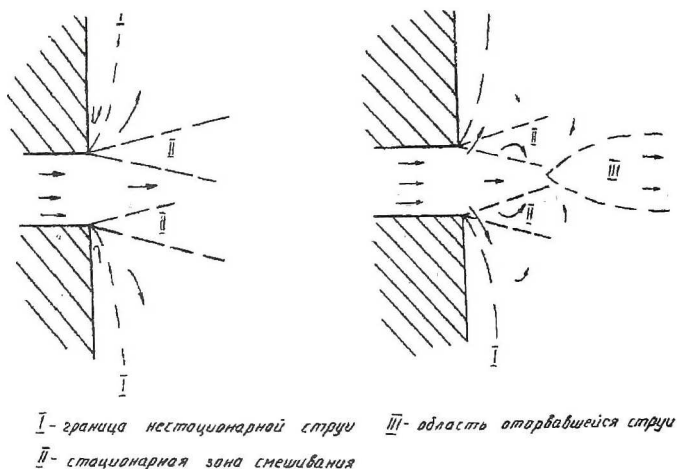


Рис. 2. Взаимодействие колеблющейся струи с застойной зоной

При ускорении возмущение окрестности струи аналогично возмущению окрестности источника. При торможении это возмущение аналогично возмущению в системе “источник - отдаляющийся сток”. В этих случаях возмущение общего расхода среды либо вовсе не убывает с увеличением расстояния от источника - места вдува струи, либо убывает обратно пропорционально первой степени этого расстояния.

Отклонение давления, потребное для “сдвига” застойной зоны, мало по сравнению со скоростным напором струи, а скорость восстановления застойной зоны мала по сравнению со скоростью газа в месте вдува. Поэтому в широком классе ситуаций застойная зона либо вовсе не восстанавливается пока идут колебания, либо до её восстановления расстояние между источником и стоком достигает нескольких калибров струи и

на этом расстоянии убывание возмущения общего расхода газа с увеличением расстояния от места вдува не наблюдается.

в) Имеется один фиксированный источник колебательного возмущения. В более общем классе колебаний возможно порождение увеличивающегося во времени числа источников, но их реализация связана такими обратными связями, что процесс воспринимается не как множество автономных процессов с единым возбуждением, но как единый процесс.

г) Колебательный процесс развивается непосредственно вблизи границ потока, во взаимодействии с ними. Протекание отдельных актов и периодов колебаний существенно влияет на течение газа в узлах, сопряженных с данной ёмкостью, включая и узлы, расположенные относительно потока выше ёмкости.

д) С помощью конструктивных изменений стенок трактов и ёмкостей в местах формирования застойных зон можно оказывать влияние на протекание отдельных колебаний. Например, помещая твердый конструктивный элемент в поток ниже места вдува струи, можно вместо детерминированного сдува - восстановления застойной зоны получить течение с нестабильными характеристиками. В случаях, когда колебания генерируются внутри ёмкости, которую пересекает струя (см. [5]), можно попытаться с помощью ввода новых конструктивных элементов уменьшить амплитуду колебаний.

Колебания этого вида считаем существенными. Для колебаний несущественных и существенных, описанных выше, характерно различие периодов. При колебаниях перемешивания струй:

$$T \leq K_1 \cdot \frac{d}{V}, \quad 4 \leq K_1 \leq 6, \quad (1)$$

где  $T$  - период,  $d$  - поперечный размер зоны смешивания,  $V$  - относительная скорость струй. При колебаниях сдува застойной зоны - прерывания струй наибольшая амплитуда вынужденных колебаний и наибольшая вероятность самопроизвольных колебаний соответствует значениям:

$$T \approx K_2 \cdot \frac{d_0}{V_0}, \quad 15 \leq K_2 \leq 20, \quad (2)$$

где:  $d_0$  - поперечный размер струи,  $V_0$  - скорость относительно стенки. Величины  $d$ ,  $d_0$  существенно зависят от разбиения потока на параллельные струйки, например в стенке жаровой трубы. Для колебаний в погра-

нических слоях у стенок трактов применима формула (1), где  $d$  определяется по расстоянию от стенки, постоянной Прандтля и, как правило, не превышает  $0,1D$  ( $D$  — поперечный размер магистрали),  $V \approx \frac{V_{\text{я}}}{K_3}$ ,  $V_{\text{я}}$  — скорость ядра потока,  $K_3 > 1$ . Для гладких труб  $K_3 \geq 3$ .

В перечисленных случаях применения формул (1), (2) размах колебаний в источнике близок к  $\frac{\rho V^2}{2}$  ( $\rho$  — плотность газа). Если струя не прерывается, но “пережимается” с изменением скорости, или застойная зона не сдувается полностью, то характерный размах колебаний — разность экстремальных значений  $\frac{\rho V^2}{2}$ .

Для решения задачи идентификации колебаний с учетом расположения датчиков относительно возможных источников могут быть использованы (с применением [6], [7]), данные об активных и реактивных сопротивлениях передачи возмущений давления, о ёмкостных свойствах окрестной системы.

**Замечание.** Выше описаны частные виды “существенных” колебаний давления. В действительности свойства а)...д) из последнего перечня характерны не только для описанных колебаний, но и для колебаний, в которых сдув застойных зон с последующим их восстановлением вызывается отсосом газа в дополнительном направлении (поперечном по отношению к основному направлению струи), а также гидравлическим или механическим нестационарным загромождением струи в ёмкости. Может иметь место взаимное влияние процессов в разных застойных зонах (см. рис. 3).

Как правило, испытывают колебания струи с криволинейной свободной границей, (струя вдувается в ёмкость через диффузор по расходящимся траекториям или (и) направление вдува не совпадает с направлением от места вдува к месту отсоса струи) и т.д.

Для предсказания возможностей изменения колебательных процессов при изменении условий испытания технической системы следует воспользоваться предложением.

**Предложение.** При данной конструкции и режиме работы газовой ёмкости поток газа может испытывать изменение направления и скорости вдува (без изменения общего расхода), причём изменение направле-

ния не выходит за пределы реализуемой разницы направлений отдельных струек, а изменение скорости, с точностью до относительно малой величины, не выходит за пределы, соответствующие вариантам безотрывного потока и отрыва от стенки на входе участка потока, предшествующего данной ёмкости (этот участок может быть диффузором либо трактом постоянного сечения после поворота). При этом направление потока на входе в предшествующий участок считаем сохраняющимся. Любые другие изменения потока равносильны изменениям конструкции или (и) режима.

Пример 1. В воздушной рубашке камеры сгорания двигателя НК-93 измерены колебания, которые идентифицируются как колебания восстановления давления в воздушной головке. Согласно нашей классификации они относятся к существенным колебаниям; несмотря на небольшую относительную амплитуду по давлению и отсутствие колебаний полных расходов топлива и воздуха. Практический смысл такой классификации проявляется в том, что при реализуемых малых числах  $M$  для потока в головке в процессе таких колебаний может качественно меняться конфигурация течения воздуха в головке, распределение потока между отверстиями в жаровой трубе, появляются и исчезают колебания “прилипания” потока к наклонной и боковой стенкам жаровой трубы. Частоты этих колебаний характерны для влияния на дальнобойность струй воздуха, вдуваемых в жаровую трубу (см.[8], стр.143). В результате создаётся возможность колебаний радиальной неравномерности температуры на входе в турбину с размахом порядка разницы стационарных значений температуры в разных точках камеры сгорания. Периоды таких колебаний достаточно велики для существенного их влияния на параметры динамического взаимодействия газа с турбинными лопатками.

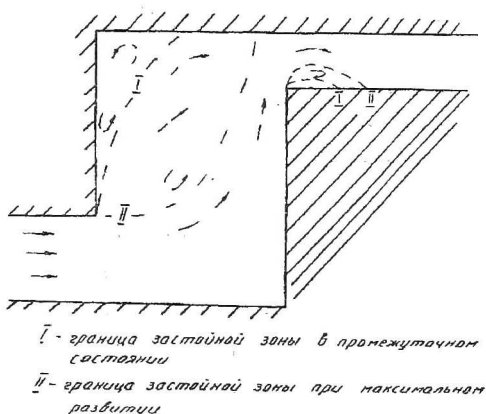


Рис. 3. Пример взаимодействия застойных зон



Влияние колебаний действительно может быть существенным. Однако для выбора каких-либо практических мероприятий необходимо в конкретных случаях решать задачу идентификации колебаний. Измерения проведены во время холодной продувки камеры сгорания при атмосферном давлении на выходе. Эксперимент проводился в боксе 9 ИС-23 НТЦ им. Н.Д. Кузнецова, участвовали работники отдела камеры сгорания ОКБ и персонал испытательной станции. Измеренный общий размах колебаний давления близок к разности скоростных напоров при расходящемся и параллельном течении газа после диффузора, а диапазоны частот соответствуют времени формирования застойных зон в головке. Согласно теоретическому анализу колебания с параметрами, близкими к указанным, могут определяться по крайней мере каждой из двух причин: а) упор потока в лицевую стенку жаровой трубы; б) расширение потока за диффузором при наличии отрыва от стенки. Другие возможные источники соответствуют уменьшенным порядкам амплитуд, увеличенным частотам колебаний. Однако непосредственная оценка амплитуды ( $\pm 7\%$  расхода воздуха, вдуваемого через боковую стенку жаровой трубы) не даёт возможности судить о существенности колебаний. Проведен прогноз возможности увеличения амплитуды колебаний и усиления их регулярности при переходе к условиям работы основного изделия. Прогнозируемые изменения связаны с возможностью частичного отрыва потока в диффузоре и связанного с этим изменения направления и скорости потока; при этом частично меняются гидравлические сопротивления форсунок и других отверстий в стенке жаровой части. Прогноз показывает возможность некоторого увеличения амплитуды, уменьшения частоты, появления преимущественных диапазонов частот для колебаний статического давления в головке, а также усиления влияния этих колебаний на колебания расхода воздуха, вдуваемого в боковые отверстия жаровой трубы, причём это влияние резко усиливается с увеличением амплитуды колебаний скорости потока в головке. Прогноз подтверждает существенность рассматриваемых колебаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ч о р и ш Ю.И. Измерение вибраций -М.: Машиздат. 1956 .
2. Авиационная акустика./ Под ред. М у н и н а А..Г. -М.: Машиностроение, 1973

3. Дубровский О.В. Исследование низкочастотных пульсаций в газотурбинных камерах сгорания // Теплоэнергетика, 1981, № 8, с.32.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. -М.: Наука, 1973.
5. Еланчик Ф.И. О динамических свойствах потока газа в камере сгорания газотурбинного давления // Вестник СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 2, -Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1999, -- С.55-61.
6. Еланчик Ф.И. Эвристические методы анализа нестационарных процессов в разветвленных магистральных, заполненных жидкостью. Сб. "Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов" -Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1994.-С.80-87.
7. Еланчик Ф.И. К эвристическим методам анализа одномерных нестационарных процессов в разветвленных магистральных, заполненных баротропной жидкостью. // Вестник СГАУ. Сер.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Вып. 3, часть 1.-Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1999.-С.254-261.
8. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. -М.: Машиностроение, 1969.

УДК 621.578

## ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССАХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ТОПЛИВА

Зимин А.И., Промтов М.А., Карепанов С.К.

*Московский военный институт*

*Тамбовский государственный технический университет*

*Московский государственный университет инженерной экологии.*

В настоящее время имеется значительное количество экологически проблемных процессов, сопровождающих сжигание топлива, в которых одним из необходимых этапов предварительной обработки рабочей среды является (или может являться) процесс диспергирования или подобный ему (эмульгирование, растворение, перемешивание).

Приготовление топливно-дисперсных смесей (дисперсных гетерогенных сред, состоящих из исходного жидкого топлива и присадок) для промышленных котельных относится к таким процессам.

Интенсифицировать процессы получения рабочих жидкостей, используемых в решениях экологических проблем, возможно при помощи